مطالعه رفتار خستگی در کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) در سطوح تنشی مختلف*

مقاله پژوهشی

سید علیرضا مقدس موسوی‌زاده(۱)	احد ضابط(۲)	سمانه صاحبیان سقی(۳)

چکیده *در این پژوهش هدف بررسی رفتار خستگی کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90] تحت سطوح تنشی مختلف است. بدین منظور ابتدا آزمون کشش انجام گرفت و مقدار استحکام نهایی برابر با MPa ۴۲۰ به دست آمد. سپس آزمون خستگی در ٤ سطح تنش ۷۰، ۵۰، ٤۲ و ۳۵ درصد استحکام نهایی انجام شد. نتایج خستگی حاصل دارای پراکندگی مطلوبی بود و منحنی برازش شده بر روی داده‌ها نیز تطابق مناسبی داشت. در نهایت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، چسبندگی میان الیاف و زمینه و ساختار شکست خستگی نمونه‌های ۷۰ و ۳۵ درصد استحکام نهایی مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق نتایج در هر دو نمونه ۷۰ و ۳۵ درصد، چسبندگی میان الیاف و زمینه مطلوب نبود و جدایش الیاف از زمینه مشاهده گردید. در سطح بار ۳۵ درصد UTS، به دلیل تضعیف پیوند میان رزین و الیاف، جدایش بین آن‌ها شدیدتر بود. همچنین در هر دو نمونه ۷۰ و ۳۵ درصد UTS مکانیزم بیرون‌زدگی الیاف دیده شد اما شدت آن در نمونه ۳۵ درصد بیشتر بود. در نمونه ۳۵ درصد، اعوجاج قابل توجهی مشاهده گردید که در نمونه ۷۰ درصد، دیده نشده بود. از طرفی، شکست ترد زمینه در نمونه ۷۰ درصد نسبت به ۳۵ درصد، وضوح بیشتری داشت. این موضوع را می‌توان به افزایش نرمی زمینه در اثر اعمال بار سیکلی ربط داد.*

واژه های کلیدی کامپوزیت GFRP، خستگی کامپوزیت، آنالیز SEM، چسبندگی الیاف و زمینه.

مقدمه

منابع فسیلی خواه یا ناخواه روزی به اتمام خواهند رسید و مشکلات و معضلات زیست محیطی خاصی که برای این منابع وجود دارد، ما را به سمت استفاده‌ی هرچه بیشتر از منابع تجدیدپذیر به خصوص انرژی خورشیدی و انرژی باد سوق می‌دهد [1]. منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی باد و انرژی خورشید را می‌توان بدون وقفه برای تولید انرژی استفاده نمود [2]. این منابع، سازگاری مناسبی با محیط‌زیست دارند و این ویژگی، یکی از مهم‌ترین دلایل محبوبیت آن‌ها برای تحقیق، توسعه و جایگزینی‌شان با منابع انرژی دیگر است [3]. انرژی باد به عنوان یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، کاربرد مفیدی در تولید برق دارد و به دلیل مزایایی همچون عدم ایجاد آلودگی محیطی، در بسیاری از کشورهای جهان استفاده می‌شود [4]. ابزار مورد استفاده برای تبدیل انرژی باد به برق، توربین‌های بادی هستند [5]. توربین‌های بادی از اجزای مختلفی تشکیل شده‌اند که پره، مهم‌ترین جز آن‌ها است. به همین دلیل در زمان طراحی پره‌های توربین بادی، باید فاکتورهای مختلفی را مدنظر قرار داد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، خستگی است. توربین‌های بادی به واسطه‌ی ساختار بلند و کشیده‌شان و همچنین ارتعاش و تصادفی بودن بار اعمالی از سوی باد، در معرض خطر خستگی قرار دارند [6-8].

جنس ماده مورد استفاده در پره توربین بادی، کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه (Glass fiber reinforced polymer) یا GFRP است [8]. استفاده از پلیمرهای تقویت شده با الیاف از سال ۱۹٤۰، آغاز شده و در سالیان اخیر حتی در ساخت سازه‌های مختلف نیز به کار گرفته می‌شوند [9]. کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف مثل GFRP، CFRP (Carbon fiber reinforced polymer) و AFRP (Aramid fiber reinforced polymer) دارای نقش مهمی در بازار مواد هستند [10]. کامپوزیتهای GFRP به عنوان یک ساختار عالی جهت رسیدن به قطعاتی با وزن کم، سفتی خمشی بالا و مقاومت کمانشی زیاد شناخته می‌شوند [11]. علی‌رغم اینکه کامپوزیت‌ها به واسطه‌ی رفتار خوبشان، کاربردهای گسترده‌ای

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۷/۱۷و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۱۲/۲۲می‌باشد.
(۱) کارشناس ارشد مهندسی مواد، گرایش شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
(۲) دانشیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
(۳) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
Email: S.Sahebian@um.ac.ir

دارند، اما این موضوع نمی‌تواند خطر شکست خستگی را برای آن‌ها از بین ببرد. با توجه به پیچیدگی زیاد ساختار کامپوزیت‌ها، مکانیزم‌های آسیب مختلفی ممکن است در آن‌ها رخ دهد که از میان این مکانیزم‌ها می‌توان به ترک زمینه(Matrix cracking) ، مویه دار شدن زمینه(Matrix crazing) ، شکست فصل مشترک الیاف و زمینه، شکست الیاف و... اشاره کرد [12,13].

تاکنون تحقیقات متعددی در رابطه با رفتار خستگی کامپوزیت‌های GFRP که به عنوان ماده اصلی پره توربین بادی شناخته می‌شوند، صورت گرفته است. دایر و آیزاک [12] در تحقیق خود اثر لایه‌چینی الیاف شیشه بر آسیب خستگی کامپوزیت زمینه پلی‌استر تقویت شده با الیاف شیشه را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که کامپوزیت GFRP با لایه‌چینی [±45] نسبت به لایه‌چینی [0/90] دارای استحکام خستگی کمتری است، زیرا تعداد الیافی که در امتداد جهت بار قرار دارند، بسیار اندک است. تصاویر میکروسکوپی از سطح شکست نمونه‌های کامپوزیت GFRP با لایه‌چینی [±45] و [0/90] نشان داد که در نمونه [0/90] ترک‌های سطحی از لبه‌ها آغاز می‌شوند و رشد ابتدایی‌شان در زاویه °٤٥ محور کششی است که در ادامه رشد ترک در جهت عمود بر محور کششی می‌شود و در تمام نمونه منتشر می‌گردد. اما در نمونه [±45] ترک فقط در سطح زمینه به وجود می‌آید و به لایه بالایی الیاف نفوذ نمی‌کند. در تحقیق دیگری کومار و سوآمی [14]، رفتار خستگی کامپوزیت GFRP را تحت مد بار ترکیبی خمشی و پیچشی بررسی کردند. آن‌ها آزمون خستگی را در ١١ سطح تنش براساس درصد استحکام نهایی (٤٠ تا ٩٠ درصد) انجام دادند. منحنی S-N حاصل از تحقیق آن‌ها دارای تطابق نسبتا مناسبی با نتایج بود. آن‌ها همچنین سه مد آسیب ترک‌خوردگی زمینه (در تعداد سیکل شکست بیش از ١٠ هزار) گسیختگی فصل مشترک و زمینه (در تعداد سیکل شکست بین ١٠٠٠ و ١٠ هزار) و شکاف فصل مشترک الیاف و زمینه (در تعداد سیکل شکست کمتر از ١٠٠) را مشاهده کردند. با این حال آن‌ها اطلاعات بیشتری را در خصوص سایر مکانیزم‌های آسیب و احتمال ایجاد اعوجاج زیاد و تغییر فرم پلاستیک در تعداد سیکل بالا را در اختیار قرار ندادند. هدف این پژوهش، مقایسه آسیب‌های خستگی و تفاوت‌های مقدار آن‌ها در سطح بار کم و زیاد خستگی برای کامپوزیت GFRP و همچنین بررسی چسبندگی میان الیاف و زمینه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی است.

مواد و روش آزمایش

در این تحقیق برای ساخت ورقه کامپوزیت GFRP از رزین اپوکسی تجاری ٢٠٤٠ ساخت شرکت اکسون فرانسه و الیاف شیشه نوع E با جهت‌گیری دو جهته [0,90] ساخت شرکت STA ترکیه استفاده شد. بدین منظور ابتدا تعداد ٧ لایه از پارچه الیاف شیشه E با جهت‌گیری دو جهته [0,90] بر روی هم قرار گرفتند. سپس به منظور در امان ماندن الیاف از آلودگی‌های محیطی، یک لایه پارچه محافظ دور تا دور آن پوشانده شد. در جدول (١)، مشخصات پارچه الیاف شیشه E برش خورده به نمایش درآمده است. در شکل (١) هم، تصویر الیاف شیشه با جهت‌گیری دو جهته متعامد [0,90] نشان داده شده است.

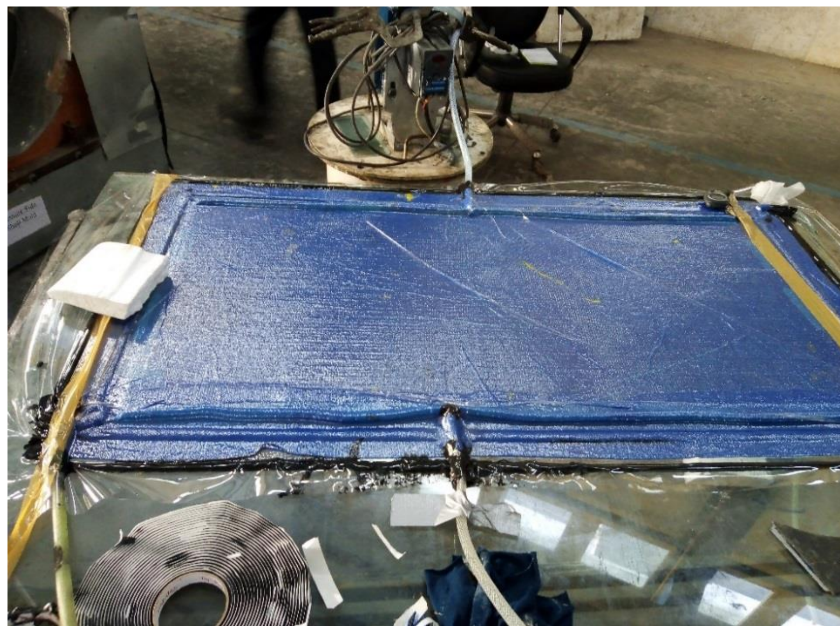
به منظور آماده‌سازی الیاف برای تزریق رزین، بایستی ابتدا بر روی میز شیشه‌ای کار، واکس مخصوصی زده شود تا در حین تزریق، رزین به میز نچسبد. این کار در فواصل زمانی ١٥ دقیقه‌ای و در سه نوبت انجام گرفت. سپس الیاف آماده شده بر روی میز کار قرار گرفتند. روش مورد استفاده برای ساخت ورقه کامپوزیت GFRP در این پژوهش، روش تزریق به کمک خلأ (Vacuum infusion process) است که به آن VIP نیز می‌گویند. بدین منظور ابتدا یک لایه مش (Mesh) بر روی الیاف قرار می‌گیرد تا سیلان رزین در زمان تزریق بهتر باشد. سپس اولین لایه بگ یا کیسه پلاستیکی بر روی مجموعه قرار می‌گیرد و خلأ با فشار ٠/٨٥- بار اعمال می‌گردد تا هوای مجموعه به طور کامل خالی شود. وجود هوا در فرایند ساخت کامپوزیت، موجب افت کیفیت ورقه کامپوزیتی می‌شود. در ادامه لایه دوم کیسه پلاستیکی نیز مطابق حالت قبل بر روی مجموعه قرار گرفت. بعد از گذشت ٢٤ ساعت، رزین اپوکسی ٢٠٤٠ با هاردنر آن EPOLAM ٢٠٤٧ به نسبت ١٠٠:٣٢ مخلوط شد و به منظور گازززدایی به مدت ٢٥ دقیقه در دستگاه مکش قرار گرفت. سپس با استفاده از شلنگ‌های تعبیه شده بر مجموعه‌ی الیاف، رزین از طریق پمپ خلأ به صورت مکشی، به مجموعه تزریق گردید. زمان ژل شدن مخلوط رزین اپوکسی ٢٠٤٠ و هاردنر EPOLAM ٢٠٤٧، ٥ ساعت می‌باشد. بعد از گذشت این زمان، ورقه کامپوزیت GFRP به مدت ٢٤ ساعت در دمای محیط قرار گرفت و سپس برای تکمیل فرایند پخت به آون با دمای ٨٠ °C به مدت ١٦ ساعت منتقل شد. شکل (٢)، آماده شدن ورقه کامپوزیت GFRP طی روش VIP را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات پارچه شیشه E مورد استفاده در پژوهش

نوع پارچه	جهت‌گیری الیاف	شرکت سازنده	ابعاد (cm)	تعداد لایه‌ها
E glass	دوجهته [0,90]	STA ترکیه	۱۲۵×۶۵	۷



شکل ۱ تصویر الیاف شیشه E با جهت‌گیری دو جهته متعامد [0,90]

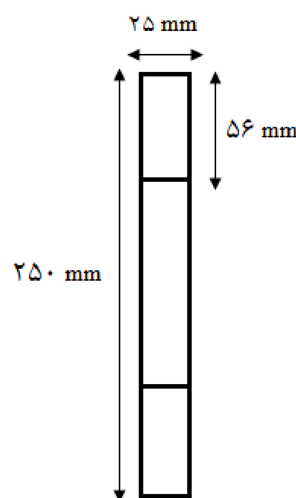


شکل ۲ آماده شدن ورقه کامپوزیت GFRP طی روش VIP.

آزمون کشش

به منظور بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت GFRP ساخته شده با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90] آزمون کشش طبق استاندارد ASTM D3039 [15] صورت پذیرفت. طبق استاندارد تعداد ۵ نمونه برای انجام آزمون کشش نیاز است و نمونه‌ها باید دارای وصله باشند تا بار به طور مستقیم به ماده اصلی وارد نشود. در شکل (۳)، تصویر شماتیک و ابعاد نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری دو جهته الیاف [0,90] طبق استاندارد D3039 آورده شده است. آزمون کشش برای نمونه‌های

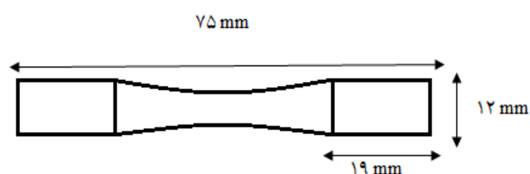
کامپوزیت GFRP با نرخ کرنش ۲ mm/min و با استفاده از دستگاه Universal zwick 250 انجام شد.



شکل ۳ نمونه کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری دو جهته [0,90] برای آزمون کشش [15]

آزمون خستگی کشش - کشش

به منظور بررسی رفتار خستگی و ترسیم منحنی S-N کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90]، آزمون خستگی طبق استاندارد ASTM D3479 [16] و در ٤ سطح تنش ۷۰، ۵۰، ٤۲ و ۳۵ درصد استحکام نهایی، با استفاده از دستگاه خستگی پژوهشکده هوا خورشید در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. در این استاندارد برای ابعاد نمونه، پیشنهاد شده که از ابعاد نمونه آزمون کشش استاندارد D3039 استفاده گردد. با توجه به اینکه دستگاه خستگی موجود توانایی اعمال نیرو به نمونه‌ای با این ابعاد را ندارد و احتمال آسیب رسانی به دستگاه و نمونه بسیار بالا می‌باشد، لذا از ابعاد دیگری برای آزمون خستگی استفاده شد. ابعاد مدنظر طبق پژوهش وال و همکاران [17] در دانشگاه مانتانا انتخاب گردید. در شکل ٤، تصویر شماتیک و ابعاد مورد استفاده برای نمونه‌های آزمون خستگی کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری دوجهته [0,90] آورده شده است.



شکل ٤ ابعاد نمونه کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری دو جهته [0,90] برای آزمون خستگی [17]

نمونه‌های آزمون خستگی مانند نمونه‌های آزمون کشش، دارای وصله هستند که بایستی در نمونه‌سازی به این موضوع توجه شود. با توجه به پراکندگی زیاد رایج در نتایج خستگی، در استاندارد D3039 به این موضوع اشاره شده که رعایت نکاتی از جمله آماده‌سازی مناسب نمونه‌ها و کنترل هم‌ترازی فک‌های دستگاه خستگی، می‌تواند به کاهش پراکندگی نتایج خستگی کمک کند. بدین منظور نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های ٦۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ به خوبی سنباده‌زنی شدند. همچنین پیش از انجام هر آزمون، تراز بودن فک‌های دستگاه خستگی کنترل گردید تا احتمال پراکندگی در نتایج کمتر شود. در استاندارد D3479 اشاره شده که فرکانس اعمال بار باید ۱۰ هرتز یا کمتر از آن باشد. برای انجام آزمون خستگی نمونه‌های کامپوزیت GFRP دوجهته [0,90]، فرکانس ۸ هرتز انتخاب گردید و نسبت تنش یا R نیز برابر با ۰/۱ درنظر گرفته شد.

آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی یا SEM

آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی یا SEM (Scanning electron microscopy) با هدف بررسی ریزساختاری شکست خستگی نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری دو جهته متعامد [0,90] در دو سطح بار زیاد و کم (۷۰ و ۳۵ درصد استحکام نهایی) و همچنین چسبندگی الیاف و زمینه انجام شد. با توجه به نارسانا بودن پلیمر و الزام رسانا بودن نمونه‌ها در آنالیز SEM، پوششی از طلا-پالادیوم بر روی نمونه‌ها اعمال گردید. آنالیز SEM با استفاده از دستگاه LEO VP1450 انجام شد.

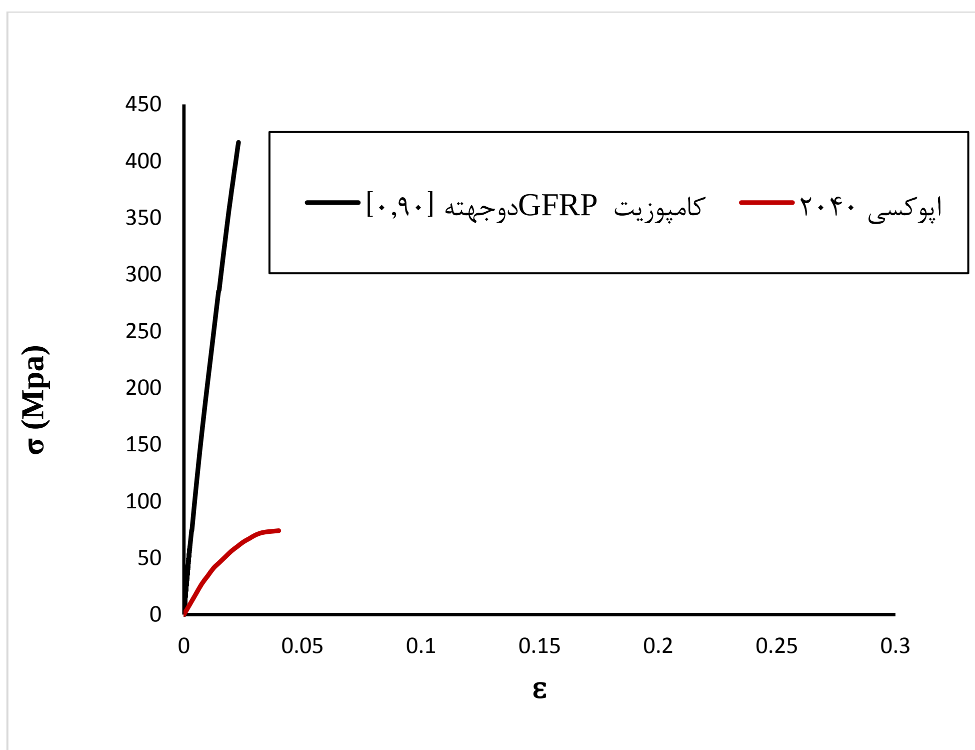
نتایج و بحث

در شکل (۵)، منحنی تنش و کرنش میانگین حاصل از آزمون کشش‌های نمونه‌های کامپوزیت GFRP در مقایسه با منحنی تنش کرنش اپوکسی تجاری ۲۰٤۰ براساس کار نصرتی [18]، آورده شده است.

با توجه به شکل (٤) مقدار استحکام نهایی در کامپوزیت GFRP به طور قابل توجهی نسبت به رزین اپوکسی ۲۰٤۰ افزایش یافته است و این موضوع اهمیت بسیار بالای

کامپوزیت‌سازی را نشان می‌دهد. در حقیقت افزودن الیاف تقویت کننده موجب افزایش استحکام برای رزین اپوکسی ۲۰٤۰ می‌شود زیرا عمده‌ی بار توسط الیاف تقویت کننده تحمل می‌گردد. در جدول (۲)، مقادیر خواص مکانیکی حاصل از کامپوزیت GFRP و رزین اپوکسی ۲۰٤۰ آورده شده است.

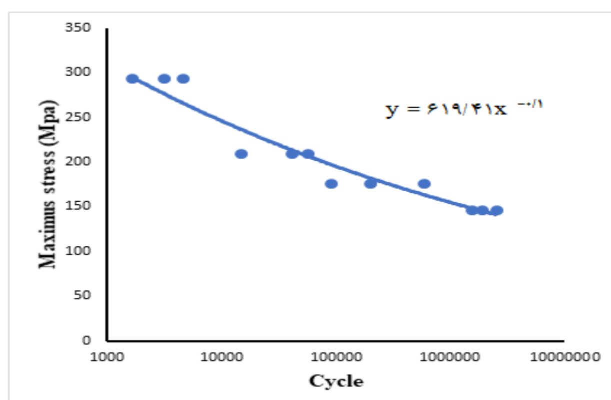
مطابق جدول (۲)، مشاهده می‌شود که استحکام نهایی در کامپوزیت زمینه اپوکسی ۲۰٤۰ تقویت شده با الیاف شیشه E با جهت‌گیری دوجهته [0,90] نسبت به رزین اپوکسی ۲۰٤۰ مجزا، حدود ٦ برابر بیشتر می‌باشد. مقدار استحکام نهایی میانگین به دست آمده در نتیجه آزمون کشش نمونه کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90] برابر ٤۲۰ MPa بوده که به عنوان معیار در تعیین سطوح تنشی آزمون خستگی نمونه‌های کامپوزیت GFRP در نظر گرفته شد. در شکل (٦)، منحنی S-N حاصل از نتایج خستگی آزمون نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری دوجهته الیاف [0,90] به نمایش درآمده است.



شکل ۵ منحنی تنش کرنش کامپوزیت GFRP دوجهته [0,90] و اپوکسی تجاری ۲۰٤۰.

جدول ۲ خواص مکانیکی حاصل از منحنی تنش کرنش کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90] براساس پژوهش فعلی و رزین اپوکسی ۲۰٤۰ طبق پژوهش نصرتی [18].

نوع ماده	خواص مکانیکی		
	استحکام نهایی (MPa)	کرنش شکست (٪)	مدول یانگ (GPa)
رزین اپوکسی ۲۰٤۰	۷۱/٤	٤/٥	۳/۰۲
کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری دو جهته [0,90]	٤۲۰	۲/٤	۱۹/۲



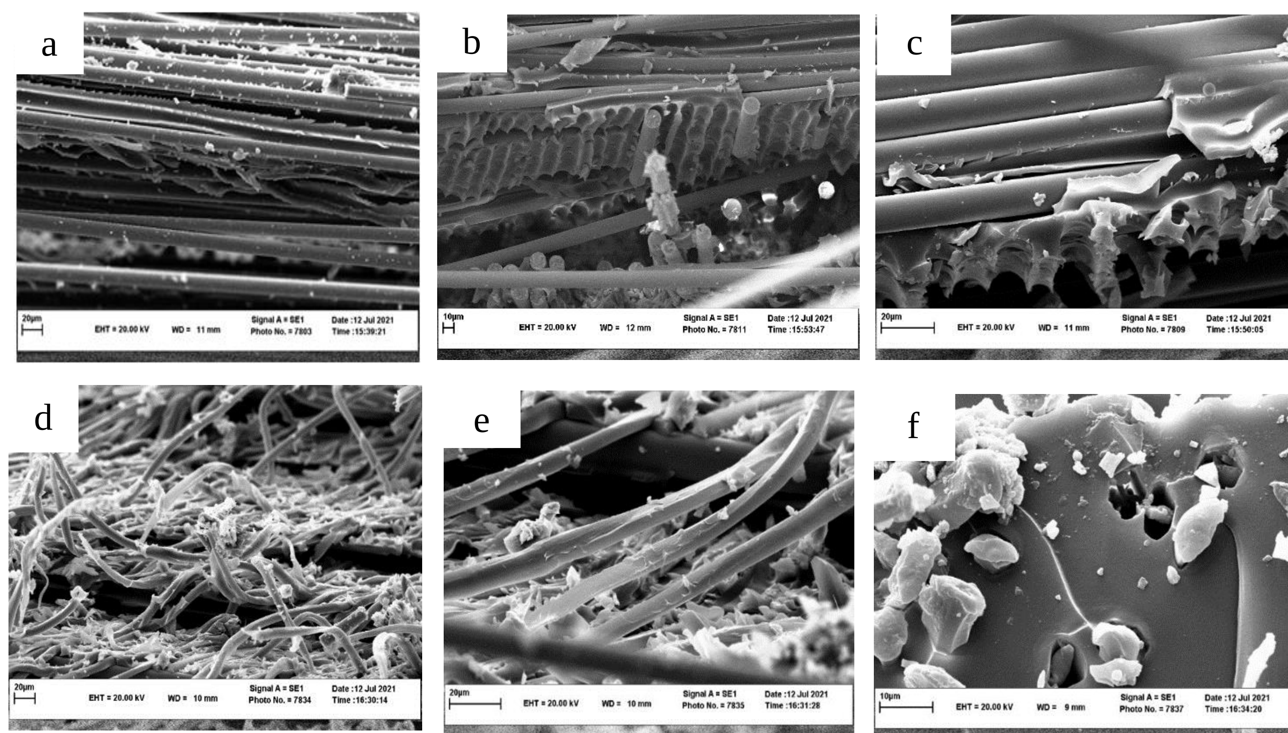
شکل ٦ منحنی S-N خستگی نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90]

مطابق شکل (٦)، مشاهده می‌شود که با کاهش سطح بار اعمالی تعداد سیکل شکست افزایش می‌یابد. منحنی برازش شده بر نقاط داده‌ها از تطابق مناسبی با داده‌ها برخوردار است زیرا مقدار ضریب تعیین یا R^2 آن نزدیک به ۱ می‌باشد و این موضوع نشان‌دهنده‌ی پراکندگی قابل قبول نتایج است. با این حال باز هم در نتایج خستگی، قاعدتاً پراکندگی وجود دارد که این موضوع را می‌توان به عواملی همچون کنترل نکردن تراز بودن فک‌ها، سنباده‌زنی نامناسب نمونه‌ها، اعمال بار اضافی و عدم بستن مناسب نمونه‌ها در فک‌های دستگاه خستگی ربط داد. منحنی برازش شده بر نتایج خستگی در شکل بالا از نوع توانی (Power – law) می‌باشد و رابطه‌ی میان عمر خستگی و استحکام خستگی با توجه به رابطه (۱) حاصل می‌شود.

$$\sigma_f = \alpha N_f \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، σ_f استحکام خستگی، N_f عمر خستگی است. همچنین α و β مقادیر ثابتی می‌باشند. این مقادیر به صورت تجربی به دست می‌آیند [19] که در این پژوهش مقدار α برابر با ٦١٩/٤١ و مقدار β برابر با ۰/۱- است. در سطح تنش ۷۰ درصد استحکام نهایی تعداد سیکل شکست در حدود ۳۰۰۰ سیکل است، درحالی که در سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی، این مقدار حتی به حدود ۲/۵ میلیون سیکل نیز می‌رسد. لذا در ریزساختار شکست نمونه کامپوزیت GFRP در دو سطح بار ۷۰ و ۳۵ درصد استحکام نهایی، می‌تواند تفاوت وجود داشته باشد. پیش‌تر به این موضوع اشاره شده که افزایش بار سیکلی موجب نرم‌شدن زمینه می‌گردد [20]. در شکل (۷)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح شکست نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری دو جهته الیاف [0,90] در دو سطح بار ۷۰ و ۳۵ درصد استحکام نهایی به نمایش درآمده است.

در تمامی تصاویر SEM شکل (۷)، می‌توان اثر الیاف بر زمینه و اثر زمینه بر روی الیاف را مشاهده نمود. چنین اتفاقی، نمایانگر چسبندگی نه چندان مطلوب میان رزین و الیاف و جدایش الیاف از زمینه است. چسبندگی میان الیاف و زمینه به عوامل مختلفی بستگی دارد که یکی از آن‌ها روش ساخت است. در روش VIP در مقایسه با روشی مثل لایه‌چینی دستی (Hand lay-up)، چسبندگی بهتری بین رزین و الیاف وجود دارد [20]. تعداد سیکل بار اعمالی نیز می‌تواند بر چسبندگی الیاف و زمینه اثر بگذارد. هرچقدر اعمال بار سیکلی شدیدتر باشد یا به عبارتی تعداد سیکل اعمالی به نمونه کامپوزیتی بیشتر شود، پیوند میان رزین و الیاف ضعیف‌تر می‌گردد [21]. در نتیجه چسبندگی بین آن‌ها هم کاهش می‌یابد که این موضوع در تصاویر مربوط نمونه سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی در شکل (۷)، مشخص است. در تصویر (۷–b) از سطح بار ۷۰ درصد استحکام نهایی و تصویر (۷–e) از سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی، مکانیزم آسیب خستگی بیرون‌زدگی الیاف (Pull out) قابل مشاهده می‌باشد. این مکانیزم در سطح بار ۳۵ درصد، یک مکانیزم غالب محسوب می‌شود. مطابق تصویر (۷–f)، بیرون‌زدگی الیاف در نمونه سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی به حدی می‌باشد که موجب برجای ماندن حفره در ساختار شده است. این موضوع نیز به تضعیف شدید پیوند الیاف و زمینه در اثر اعمال تعداد سیکل بار زیاد برمی‌گردد.



شکل ۷ تصاویر SEM سطح شکست خستگی نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دوجهته [0,90] b،a و c) سطح بار ۷۰ درصد استحکام نهایی. d، e و f) سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی.

در تصویر (۷–c) از سطح بار ۷۰ درصد استحکام نهایی، شکست ترد زمینه به عنوان یکی از مکانیزم‌های آسیب خستگی به وضوح مشاهده می‌شود. اما در تصاویر سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی به ویژه تصویر (۷–e) و (۷–f) ، شکست ترد زمینه کمتر دیده می‌شود. در حقیقت اعمال تعداد سیکل زیاد مطابق انتظار، موجب نرم‌تر شدن زمینه می‌گردد و در نتیجه تغییر فرم پلاستیک نیز افزایش می‌یابد. نکته مهم در تصاویر SEM مربوط به نمونه سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی، وجود اعوجاج زیاد در ساختار است. چنین اعوجاجی در ساختار نمونه سطح بار ۷۰ درصد استحکام نهایی مشاهده نشده است. در نتیجه می‌توان اذعان داشت که در سطح بار ۳۵ درصد که تعداد سیکل بار زیادی به نمونه اعمال می‌شود، اعوجاج قابل توجهی در ساختار به وجود می‌آید. این موضوع را می‌توان به فعال شدن مکانیزم‌های مختلف آسیب خستگی در سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی ربط داد که موجب افزایش اعوجاج و تغییر شکل پلاستیک در ساختار می‌شود.

نتیجه‌گیری

۱. استحکام نهایی حاصل از آزمون کشش نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90] برابر با MPa ۴۲۰ به دست آمد که در مقایسه با استحکام نهایی رزین اپوکسی ۲۰٤۰، حدود ٦ برابر افزایش یافته است.

۲. آزمون خستگی در مد کشش–کشش برای نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90] در ٤ سطح تنش ۷۰، ۵۰، ٤۲ و ۳۵ درصد استحکام نهایی انجام شد و منحنی S-N برازش شده دارای تطابق مطلوبی با نتایج بود.

۳. آنالیز SEM برای سطح شکست نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90]در دو سطح بار ۷۰ و ۳۵ درصد استحکام نهایی انجام شد. در تصاویر هر دو سطح بار اثر زمینه بر الیاف و اثر الیاف بر زمینه مشاهده گردید که حاکی از چسبندگی نه چندان مطلوب رزین و زمینه و جدایش بین آن‌ها بود. این چسبندگی در سطح بار ۳۵ درصد UTS شدت بیشتری داشت زیرا پیوند میان رزین و الیاف ضعیف‌تر شده بود. در سطح بار ۳۵ درصد، مکانیزم

بیرون‌زدگی الیاف، یکی از مکانیزم‌های آسیب غالب بود و شدت بالای آن موجب ایجاد حفره در ساختار گردید. اما در سطح بار ۷۰ درصد استحکام نهایی، مکانیزم بیرون زدگی الیاف به طور نسبی دیده شد. همچنین شکست ترد زمینه در ساختار شکست خستگی نمونه ۷۰ درصد استحکام نهایی به خوبی مشاهده گردید، در حالی که در نمونه ۳۵ درصد استحکام نهایی، خردایش ترد زمینه نمود کمتری داشت و این نشان‌دهنده نرم‌تر شدن زمینه به دلیل اعمال تعداد بار سیکلی زیاد و وقوع تغییر فرم پلاستیک است. همچنین در ساختار شکست نمونه ۳۵ درصد استحکام نهایی، اعوجاج زیادی نیز مشاهده شد که این موضوع هم بر وقوع بیشتر تغییر فرم پلاستیک در شکست این نمونه، صحه می‌گذارد.

مراجع

۱. یوسف محمدی نژاد، "انرژی پاک نیاز و ضرورت هزارهی سوم"، انتشارات نگارنده دانش تهران، (۱۳۹۲).

2. N.L. Panwara, S.C. Kaushik, Surendra Kotharia., "Role of renewable energy sources in environmental protection: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews 15*, India (2011).

3. Richa Kothari,V.V. Tyagi, Ashish Pathak., "Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development", *Sustainable Energy Reviews 14*, India (2010).

4. Balat M., "Review of modern wind turbine technology", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 31, No. 17, (2009).

5. Balat M,. "Usage of energy sources and environmental problems", *Energy Exploration and Exploitation*, Vol. 23, No. 2, (2005).

6. Mayer RM., "Design of composite structures against fatigue applications to wind turbine blades", Chippenham, Antony Rowe Ltd, pp. 195-208, (1996).

7. Kong C, Kim H, Kim J., "A study on structural and aerodynamic design of composite blade for large scale HAWT system", Final report, Hankuk Fiber Ltd, (2000).

8. B.Yang , D. Sun., "Testing inspecting and monitoring technologies for wind turbine blades: A survey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp 515-526. Vol. 22, (2013).

9. C. Bakis, L.C. Bank, V. Brown, E. Cosenza, J. Davalos, J. Lesko, et al., "Fiber reinforced polymer composites for construction-state-of-the-art review", *Journal of Composoties*, Vol. 6, No. 2, (2002).

10. G. D. Sims ,W. R. Broughton., "Glass Fiber Reinforced Plastics- Properties", National Physical Laboratory. Tiddington, UK.

11. Douglas S. Cairns, John D Shramstad., "Evaluation of Hand Lay-up And Resin Transfer Molding in Composite Wind Turbine Blade Structures", Sandia Online labratories, (2012).

12. K. P. Dyer and D. H. Isaac., "Fatigue behavior of continuous glass fiber reinforced composites", *Composites Part B: Engineering*,Vol .29,No. 6, pp.725-733, (1998)

13. Joris Degrieck and Wim Van Paepegem., "Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials: Review", *Mechanical Review*, Vol. 54, No. 4, (2001).

14. Hemanth Kumar C, R.P. Swamy., "Fatigue life prediction of glass fiber reinforced epoxy composites using artificial neural networks",*Composites Communications*, Vol. 26, (2021).

15. ASTM D3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

16. ASTM D3479, Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials.

17. Neil Kelly Wahl., "Spectrum fatigue lifetime and residual strength for fiberglass laminates", A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Montana, (2001).

۱۸. نادیا نصرتی، "بررسی رفتار خزشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه به کار رفته در ساخت پره توربین بادی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۹۶).

19. Kalyan Kumar Singh, Md. Touhid Alam Ansari, Md. Sikandar Azam., "Fatigue life and damage evolution in woven GFRP angle ply laminates", *International Journal of Fatigue*, Vol 142, (2021).

۲۰. مهران طغرایی، "بررسی رفتار خستگی کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه ساخته شده به دو روش لایه گذاری دستی و تزریق رزین به کمک خلأ (VIP)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۹۳).

21. Wahid Ferdous, Allan Manalo, Joshua Peauril, Choman Salih, Kakarla Raghava Reddy, Peng Yu, Peter Schubel, Tom Heyer, "Testing and modelling the fatigue behavior of GFRP composites, Effect of stress level, stress concentration and frequency", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 23, No. 5, pp. 1223-1232, (2020).